第 37 卷第 13 期
2017 年 7 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.13
Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201408291724

周伟,牟凤云,刚成诚,官冬杰,何锦峰,李建龙.1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系.生态学报,2017,37(13):4335-4345.

Zhou W, Mu F Y, Gang C C, Guan D J, He J F, Li J L.Spatio-temporal dynamics of grassland net primary productivity and their relationship with climatic factors from 1982 to 2010 in China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(13):4335-4345.

1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系

周 伟[1,*],牟凤云[1],刚成诚[2],官冬杰[1],何锦峰[1],李建龙[3]

1 重庆交通大学, 建筑与城市规划学院,重庆 400074

2 西北农林科技大学, 水土保持研究所, 杨凌 712100

3 南京大学, 生命科学学院,南京 210093

摘要:植被净初级生产力(NPP)及其与气候变化的响应研究是全球变化的核心内容之一。论文基于长时间序列遥感数据和气象数据,通过光能利用率模型(Carnegie-Ames-Stanford approach, CASA 模型)模拟了 1982—2010 年中国草地 NPP,进而分析其时空变化特征及其与气候水热因子的相关性。结果表明:(1)1982—2010 年中国草地年平均 NPP 为282.0 gC $m^{-2}a^{-1}$,年总 NPP 的多年平均值为 988.3 TgC;空间分布上呈现东南部高西北部低的特征。(2)近 30 年中国草地 NPP 增加速率为 0.6 gC $m^{-2}a^{-1}$,呈增加趋势的面积占中国草地总面积的 67.2%;总体上,中国草地 NPP 呈极显著和显著增加的比例(35.8%、8.0%)大于呈极显著和显著减少的比例(5.8%、4.8%);NPP 明显增加的区域主要包括青藏高原西部、阿拉善高原、新疆西部;明显降低的区域主要分布在内蒙古地区;不同年代际和不同草地类型的 NPP 变化趋势差异明显。(3)草地 NPP 与降水量的相关性高于与温度的相关性。不同草地类型 NPP 对气温、降水量的响应程度不同,其中温性荒漠草原 、温性草原、温性草甸草原的 NPP 与降水量均达到显著正相关($P<0.05$)。

关键词:草地净初级生产力;时空动态;气温;降水量;耦合关系分析

Spatio-temporal dynamics of grassland net primary productivity and their relationship with climatic factors from 1982 to 2010 in China

ZHOU Wei[1,*], MU Fengyun[1], GANG Chengcheng[2], GUAN Dongjie[1], HE Jinfeng[1], LI Jianlong[3]

1 *College of Architecture and Urban Planning*, *Chongqing Jiaotong University*, *Chongqing* 400074, *China*

2 *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest Agriculture and Forestry University*, *Yangling* 712100, *China*

3 *School of Life Science*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210093, *China*

Abstract: Global warming has led to significant vegetation changes in the past half century. Grasslands in China are mainly located in ecologically fragile regions, which are sensitive to climate change. During recent decades, grasslands have experienced prominent warming and drying. Therefore, investigating the response of grasslands to climatic variations is necessary for a better understanding of the cumulative consequences of climate change. Grassland net primary productivity (NPP) is an important indicator for evaluating grassland ecosystem conditions. We used multi-source remote-sensing data and meteorological data to estimate the grassland NPP from 1982 to 2010, based on the Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model. The spatial pattern and change trends of grassland NPP were evaluated. The response of grassland NPP

基金项目:国家自然科学基金(41501575,41501202);重庆市科委基础科学与前沿技术项目(cstc2016jcyjA1540,cstc2014jcyjA0808);重庆交通大学博士科研启动金(14JDKJC-B017)

收稿日期:2014-08-29; **网络出版日期:**2017-02-23

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhouw866@163.com

changes to climatic variations was also analyzed. The results revealed that the spatial distribution of grassland NPP showed an increasing trend from the northwest to southeast across China. During the period from 1982 to 2010, the grassland mean NPP was 282 gC $m^{-2}a^{-1}$, and NPP exhibited apparent spatial heterogeneity, being highest (710 gC $m^{-2}a^{-1}$) in the dry heat savanna shrub and grass and lowest (58 gC $m^{-2}a^{-1}$) in the alpine desert. The total annual NPP was 988.3 Tg C. Grassland NPP has increased slightly in the past 30 years, at a rate of 0.6 gC $m^{-2}a^{-1}$. Regions showing increasing NPP accounted for 67.2% of the total grassland areas, within which, areas with extremely significant (P<0.01) and significant (P<0.05) increases accounted for 35.8% and 8.0% of the total grassland area, respectively. Regions showing extremely significant and significant decreases encompassed only 5.8% and 4.8% of total grassland area, respectively. Clear increases in grassland NPP were observed in the west of the Qinghai-Tibet Plateau, the Alxa Plateau and western area of Xinjiang. Areas with a decrease in grassland NPP were mainly distributed in the western regions of Inner Mongolia. Furthermore, the increasing rate of NPP showed temporal variation and differed among different grassland types. The correlation coefficient between NPP and precipitation was larger than that between NPP and temperature. Moreover, the response of grassland NPP to temperature and precipitation differed for different grassland types. There were significant positive correlations between annual precipitation and NPP in temperate desert steppe, temperate steppe, and temperate meadow steppe.

Key Words: grassland net primary productivity; spatio-temporal dynamics; temperature; precipitation; the coupling relation analysis

陆地生态系统对气候变化的响应是全球变化研究的焦点之一[1],植被是气候变化最直观的体现和重要标志[2]。全球CO_2浓度在1975—2011年间升高了40%(280—391cm³/m³),全球平均气温在1880—2012年间升高了0.85℃,北半球在过去1400年中1983—2012年是最暖的30a,北半球中纬度陆地平均降水量增加,强厄尔尼诺事件导致水热条件的变化[3]。所有这些变化(气候变化、人为干扰、生态过程变化)均会对陆地植被净初级生产力(NPP)产生影响[4-5]。全球或区域尺度陆地生态系统NPP的研究始于19世纪中期,气候因子对生态系统NPP的影响学术界存在不同认识[6]。有研究表明在1980—2000年间,全球陆地植被NPP呈增加趋势,然而不同区域其增加原因不同[5]。也有研究综合分析了1982—1999年全球陆地植被NPP与气候数据的耦合关系,发现气候变化使气候的胁迫作用得到缓解,导致全球陆地植被NPP总量增加了6%[7]。在全球气候变化的大背景下,中国的气候也发生了相应变化[8-11],陆地植被NPP表现出一定的增长趋势[12],气候变化使水热条件对植被生长的胁迫作用减弱,并且中国植被NPP对气候变化的响应具有明显的区域差异性[13]。

草地作为陆地生态系统的重要组成部分,覆盖了陆地表面20%的区域,因其巨大的覆盖面积和类型的多样性,使其在区域乃至全球碳循环研究中具有独特的地位和重要性[14-15]。中国草地主要分布在北方干旱、半干旱气候区以及青藏高原高寒气候区,这些区域位于全球气候变化的敏感地带和生态环境脆弱区。NPP是草地生态系统固碳能力的重要表征,因此定量研究我国草地NPP的时空变化特征及其对气候变化的响应,可为正确评价草地生态系统生产能力提供科学依据,并有助于认识全球变化对陆地生态系统碳循环的影响机制。近年来,国内外学者针对中国草地NPP模拟及其对气候变化的响应开展了广泛研究[16-20],由于研究时段和空间尺度的差异,以及数据来源的不同,导致NPP的模拟结果间可比性较差,并且不同区域草地NPP对气候水热因子的响应具有差异性。

鉴于以上,为了更好地理解和综合分析长时间序列上中国草地NPP时空动态及其与气候变化的关系,本研究以1982—2010年中国草地生态系统为例:1)基于CASA模型,利用NDVI数据、气象数据和土地覆盖数据,对中国草地NPP进行动态模拟,阐明近30年来中国草地NPP的时空变化特征,2)通过中国草地NPP与气象数据的耦合分析,揭示不同时段和不同类型草地NPP的变化趋势及其对气候水热因子变化的响应特征。这对全球气候变化背景下草地生态系统碳循环和碳收支研究具有重要的理论和实践意义,同时可为草地资源

保护和草地生态系统的可持续发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　数据来源与预处理

1.1.1　GIMMS NDVI 数据及处理

本研究采用美国国家航天航空局(NASA)全球监测与模型研究组(GIMMS)提供的 NDVI 半月最大合成数据作为数据源(http://ecocast.arc.nasa.gov/)。其时间序列为 1982—2010 年,空间分辨率为 8km×8km。该数据集是目前最长时间序列的 NDVI 数据,与其他 NDVI 数据相比,其误差小、精度较高,已广泛应用于全球及区域大尺度植被变化的研究中。因最大值合成法(Max Value Composite,MVC)能消除一部分云、大气、太阳高度角的干扰,本文采用 MVC 获取每月的 NDVI 数据,采用 WGS-1984 地理坐标系统和 Albers Equal-Area Conic 投影。

1.1.2　气象数据及处理

本研究采用中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)提供的 1982—2010 年全国 720 个标准气象站点的月平均气温、月降水量,以及全国 102 个辐射站点的月太阳总辐射数据。根据各气象站点的经纬度和高程信息,利用 Anuspline 软件对气象数据进行空间插补,获取与 NDVI 数据分辨率和投影系统相同的气象数据栅格影像。

1.1.3　草地类型数据

本文采用的草地分类数据来源于 20 世纪 80 年代全国草地资源调查[21]。该分类系统依据植被-生境(地形、土壤、气候)分类原则将中国草地划分为 19 大类,包括温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、高寒草甸草原、高寒草原、高寒荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠、高寒荒漠、暖性草丛、暖性灌草丛、热性草丛、热性灌草丛、干热稀树灌草丛、低地草甸、山地草甸、高寒草甸、沼泽、改良草地。该分类系统中草地面积达 352 万 km^2,占中国陆地面积的 37%。

1.2　净初级生产力 NPP 的模型模拟和精度验证

1.2.1　CASA 模型

目前各国学者基于不同的理论基础、研究尺度和数据来源建立了多种植被 NPP 估算模型。模型可分为 3 类:1)统计模型;2)参数模型;3)过程模型。CASA 模型是基于光能利用率原理的过程模型,已被全球 1900 多个实测站点校准。CASA 模型估算的植被 NPP 可以由植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ε)两个变量来确定[22],其估算公式如下:

$$\mathrm{NPP}(x,t) = \mathrm{APAR}(x,t) \times \varepsilon(x,t) \tag{1}$$

式中,APAR(x, t)表示像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射(MJ/m^2),ε(x, t)表示像元 x 在 t 月份的实际光能利用率(g C/MJ)。

APAR 的估算

光合有效辐射(PAR)是植被进行光合作用的动力,植被吸收的光合有效辐射(APAR)取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射的吸收比例,计算公式如下:

$$\mathrm{APAR}(x,t) = \mathrm{SOL}(x,t) \times \mathrm{FPAR}(x,t) \times 0.5 \tag{2}$$

式中,SOL(x, t)表示像元 x 在 t 月份的太阳总辐射量(MJ/m^2);常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(400—700 nm)占太阳总辐射的比例;FPAR 表示植被层对入射的光合有效辐射(PAR)的吸收比例,在一定范围内 FPAR 与 NDVI、SR 存在较好的线性关系。FPAR 的具体计算过程参照文献[22]。

最大光能利用率 ε_{max} 的估算

光能利用率(ε)是指植被把所吸收的光合有效辐射(PAR)转化为有机碳的效率,它主要受温度和水分的影响,计算公式如下:

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon1}(x,t) \times T_{\varepsilon2}(x,t) \times W_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{max} \tag{3}$$

式中，$T_{\varepsilon1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon2}(x,t)$ 表示温度对光能利用率的影响，$W_{\varepsilon}(x,t)$ 表示水分条件对光能利用率的影响，ε_{max} 表示在理想状态下植被的最大光能利用率，其取值因植被类型不同有较大差别。传统 CASA 模型中所使用的全球植被最大光能利用率为 0.389gC/MJ，在实际应用时常根据研究区具体植被类型对这一取值进行修正。Zhu 等根据误差最小原则，利用中国的 NPP 实测数据，模拟各植被类型的最大光能利用率，该研究成果在估算中国植被 NPP 时得到广泛应用，本文 ε_{max} 的取值也参照这一成果，其中草地 ε_{max} 为 0.542 gC/MJ；$T_{\varepsilon1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon2}(x,t)$ 的具体计算方法及改进参照文献[23]。

1.2.2 CASA 模型模拟精度验证

由于实测 NPP 难度比较大，通常采用生物量换算 NPP 的方法进行模型验证。为了验证模型精度，于 2009 年 7、8 月份草地植被生长旺盛的季节，在研究区进行草地生物量实地采样调查，共设置样地 51 个（图 1），每个样地面积为 10m×10m，在每个样地内选择地形平坦、草地分布均匀处设置 1m×1m 的样方共 5 个。在每个样方内，齐地收割植物地上部分，然后在 70℃ 的恒温烘箱内烘干至恒重后称取干重。根据国内公开发表的关于不同类型草地地下和地上生物量的分配比例[24]，根据根冠比和地上生物量计算地下生物量，然后取碳转化系数为 0.475，得到 NPP。51 个站点的 CASA 模型模拟 NPP 值与实测 NPP 值的一致性比较如图 2，由图可见，NPP 模拟值与实测值分布在 1:1 线附近，同时统计分析表明相对误差（REE =（模拟值－实测值）/实测值）在 17%—30% 之间，平均精度达到 86%。由此可见 CASA 模型的模拟结果较为理想，并与实测 NPP 值间存在极高的一致性。以上表明基于 CASA 模型模拟得到的中国草地 NPP 具有很高的模拟精度，适用于中国草地 NPP 模拟。

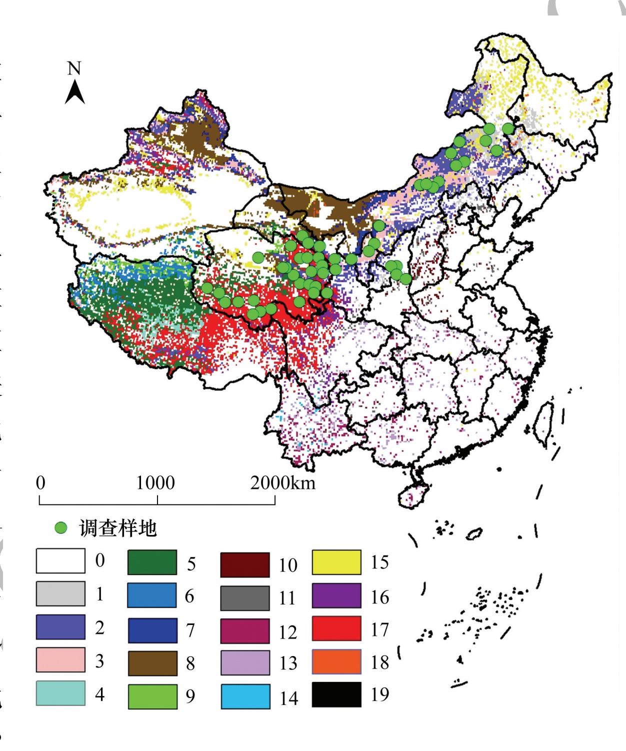


图 1 调查样地和草地类型图

Fig.1 Field survey sites and grassland types

0：非草地；1：温性草甸草原；2：温性草原；3：温性荒漠草原；4：高寒草甸草原；5：高寒草原；6：高寒荒漠草原；7：温性草原化荒漠；8：温性荒漠；9：高寒荒漠；10：暖性草丛；11：暖性灌草丛；12：热性草丛；13：热性灌草丛；14：干热稀树灌草丛；15：低地草甸；16：山地草甸；17：高寒草甸；18：沼泽；19：改良草地

1.3 草地 NPP 的年际变化趋势分析

本研究采用一元线性回归分析方法对 1982—2010 年中国草地 NPP 的动态进行变化趋势分析，单个象元多年回归方程中趋势线斜率即为年际变化率。计算公式为：

$$\theta_{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times NPP_i - (\sum_{i=1}^{n} i)(\sum_{i=1}^{n} NPP_i)}{n \times \sum_{i}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2} \tag{4}$$

式中，θ_{slope} 为趋势线斜率，n 为监测时间段的年数，NPP_i 为第 i 年的草地 NPP，斜率为负表示下降，反之则表示上升。

变化趋势的显著性检验采用 F 检验，显著性仅代表趋势性变化可置信程度的高低，与变化快慢无关。统计量计算公式为：

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \tag{5}$$

式中, $U=\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y})^2$ 称为回归平方和, $Q=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$ 称为剩余平方和, y_i 是第 i 年 NPP 值, $\hat{y}_i$ 是第 i 年 NPP 的回归值, $\bar{y}$ 是 29a NPP 的平均值, $n=29$ 为年数。

1.4　草地 NPP 与气候因子的相关系数计算

本研究采用基于像元的空间分析方法对草地 NPP 与气候因子间的相关性进行分析,年尺度的植被 NPP 与年均气温或降水量的相关系数计算公式如下:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\bar{x})\sum_{i=1}^{n}[(y_i-\bar{y})}} \qquad (6)$$

式中, R_{xy} 为 x、y 两个变量的相关系数, x_i 为第 i 年的草地 NPP, y_i 为第 i 年的年平均气温或降水量, $\bar{x}$ 为草地 NPP 的多年平均值, $\bar{y}$ 为年均气温或降水量的多年平均值, i 是样本数,为 29a。

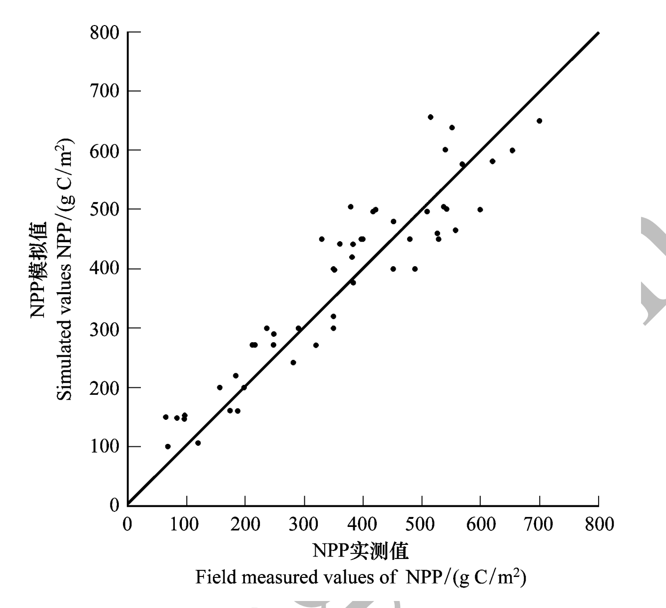


图 2　草地 NPP 模拟值与实测值的一致性检验

Fig.2　The consistency test of grassland NPP field measured value and CASA model simulation value

2　结果与分析

2.1　中国草地 NPP 的空间分布特征分析

1982—2010 年中国草地年平均 NPP 为 282.0 gC $m^{-2}a^{-1}$,空间分布上总体呈现东南部高西北部低的特征(图 3)。其中平均 NPP 低于 50gC $m^{-2}a^{-1}$的区域位于阿拉善高原、新疆南部,青藏高原北部,占中国草地面积的 10.8%;平均 NPP 介于 100—200gC $m^{-2}a^{-1}$的草地分布范围最广面积最大,主要位于青藏高原西部、鄂尔多斯高原、蒙古高原的内蒙古中部,面积占中国草地总面积的 21.5%;平均 NPP 介于 200—300gC $m^{-2}a^{-1}$、300—400gC $m^{-2}a^{-1}$、400—500gC $m^{-2}a^{-1}$的草地沿中国西南—东北走向依次分布,其面积分别占中国草地总面积的 11.4%、10.2%、10.3%;平均 NPP 介于 600—1150 gC $m^{-2}a^{-1}$的草地主要分布在南方草山草坡,面积占中国草地总面积的 9.0%。

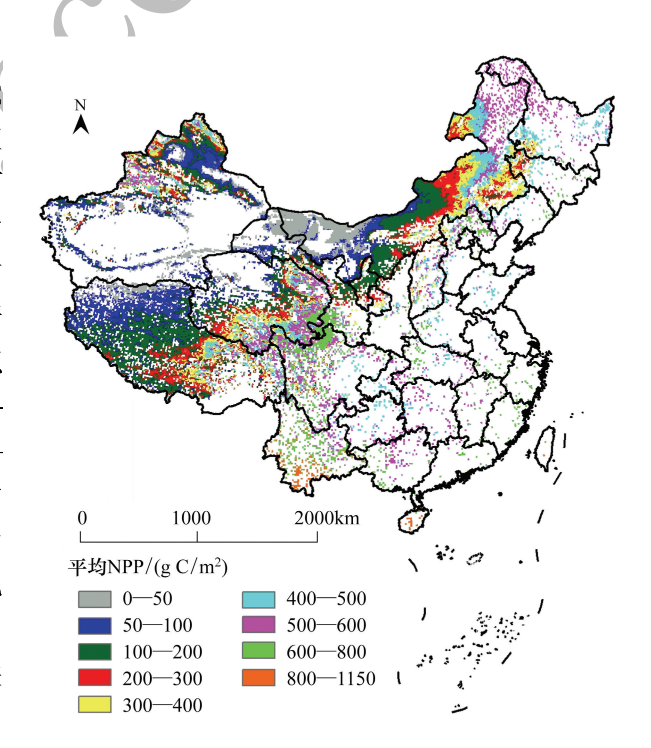


图 3　1982—2010 年中国草地平均 NPP 的空间分布格局

Fig.3　Spatial pattern of mean grassland NPP in China during 1982—2010

如表 1 所示,中国 19 类草地的平均 NPP 有较大差异:干热稀树灌草丛的平均 NPP 最大,为 710.2 gC/m^2;热性草丛次之,为 658.0 gC/m^2;热性灌草丛为 602.6 gC/m^2;高寒荒漠平均 NPP 最低,为 57.7 gC/m^2,高寒荒漠草原平均 NPP 为 63.0 gC/m^2。中国草地年 NPP 总量的多年平均值为 988.3 Tg C(1 Tg=10^{12}g),其中高寒草甸 NPP 总量最大为 249.3 Tg C/a,占总量的 25.2%;温性草原次之为 117.2 Tg C,山地草甸为 75.2 Tg C,改良草地的 NPP 总量最小为 1 Tg C。

表 1 不同草地类型的年平均 NPP 和总 NPP

Table 1 The mean and total NPP for different grassland types

草地类型 Grassland types	平均 NPP Mean NPP/ (gC/m²)	NPP 总量 Total NPP/ TgC	草地类型 Grassland types	平均 NPP Mean NPP/ (gC/m²)	NPP 总量 Total NPP/ TgC
温性草甸草原 Temperate meadow steppe	438.6	71.0	温性草原 Temperate steppe	292.4	117.2
温性荒漠草原 Temperate desert steppe	161.8	33.3	高寒草甸草原 Alpine meadow steppe	167.1	10.9
高寒草原 Alpine steppe	132.8	59.3	高寒荒漠草原 Alpine desert steppe	63.0	7.0
温性草原化荒漠 Temperate steppification desert	105.6	11.7	温性荒漠 Temperate desert	78.4	37.3
高寒荒漠 Alpine desert	57.7	3.6	暖性草丛 Warm grass	497.5	23.1
暖性灌草丛 Warm shrub grass	549.2	34.2	热性草丛 Hot grass	658	72.5
热性灌草丛 Hot shrub grass	602.6	76.0	干热稀树灌草丛 Dry savanna shrub	710.2	4.4
低地草甸 Lowland meadow	337.1	95.0	山地草甸 Mountain meadow	535.4	75.2
高寒草甸 Alpine meadow	368.4	249.3	沼泽 Swamp	396.1	6.4
改良草地 Improved grassland	391.6	1.0			

2.2 中国草地 NPP 的时间动态分析

1982—2010 年间草地 NPP 总量的年际波动较大(图 4), 其中 1994、1998 和 2002 年较高,NPP 总量分别为 1112.7 Tg C、1102.7Tg C 和 1077.3 Tg C,以上 3a 的 NPP 总量分别高于多年平均值(988.3 Tg C)11.1%、10.3% 和 8.2%。1982 年 NPP 总量仅为 896.0 Tg C,为 29 年间最低值,比多年平均值低 10.4%;1985、1987 年 NPP 总量也较低,分别为 915.7 Tg C 和 919.3 Tg C。

1982—2010 年中国草地 NPP 年际变化趋势的空间分布格局显示:中国草地 NPP 呈增加趋势,增加速率为 0.6 gC $m^{-2}a^{-1}$(图 5)。NPP 显著增加的区域主要分布在青藏高原西部、阿拉善高原、新疆西部,而 NPP 显著降低的区域主要分布在蒙古高原的内蒙古部分(图 5)。

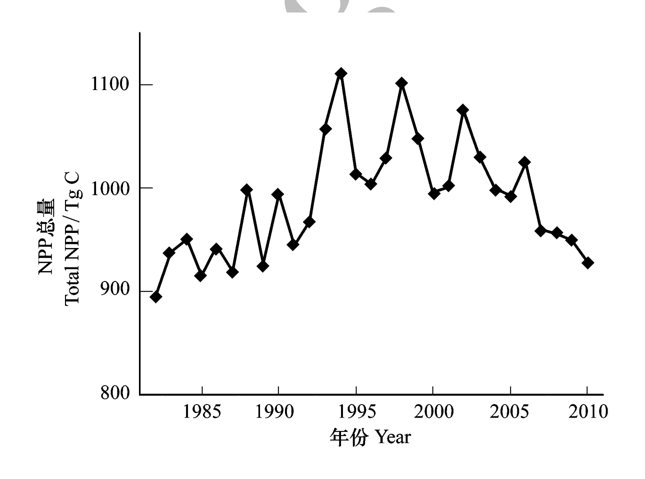


图 4 1982—2010 年中国草地年 NPP 总量的变化趋势

Fig.4 Inter-annual changing trend of annual total NPP of grassland in China

从草地 NPP 变化的显著性统计可看出(表 2),草地 NPP 呈增加趋势的面积占中国草地总面积的 67.3%;并且呈极显著增加(35.8%)、显著增加(8.0%)的比例大于呈极显著减少(5.8%)、显著减少(4.8%)的比例。19 类草地 NPP 变化的显著性有明显差异,其中高寒荒漠草原 NPP 呈增加趋势的比例最大为 99.5%,且极显著增加的比例达到 89.8%;高寒荒漠、高寒草甸草原、高寒草原、温性荒漠,其 NPP 呈增加趋势的比例也较高,依次为 98.7%、96.8%、95.4%、91.2%。而温性草甸草原 NPP 呈减少趋势的比例最大为 85%,且极显著减少的比例为 35.9%;暖性草丛、暖性灌草丛、热性灌草丛、干热稀树灌草丛,其 NPP 呈减少趋势的比例也较大,分别为 75.9%、69.4%、68.4%、65.1%。总体上高寒地区草地平均 NPP 增加,南方草山草坡平均 NPP 减少,原因可能是青藏高原地区气候的暖湿化,有利于高寒地区草地植被生长;然而对于南方灌草丛,气温升高降水量减少不利于草地植被生长和生物量积累。

2.3 草地 NPP 年际变化与年均气温、降水量的相关性分析

1982—2010 年中国气温、降水量的变化趋势如图 6 所示,新疆、阿拉善高原、青藏高原的年均气温升高,且降水量增加,暖湿化趋势明显;南方草山草坡分布区暖干化趋势明显(图 6)。统计分析表明,近 30 年中国草地分布区气温呈增加趋势(0.39℃/10a),且气温呈增加趋势的面积占中国草地总面积的 84%;降水量呈减少趋势(-3.93mm/10a),其面积比例达 56%。

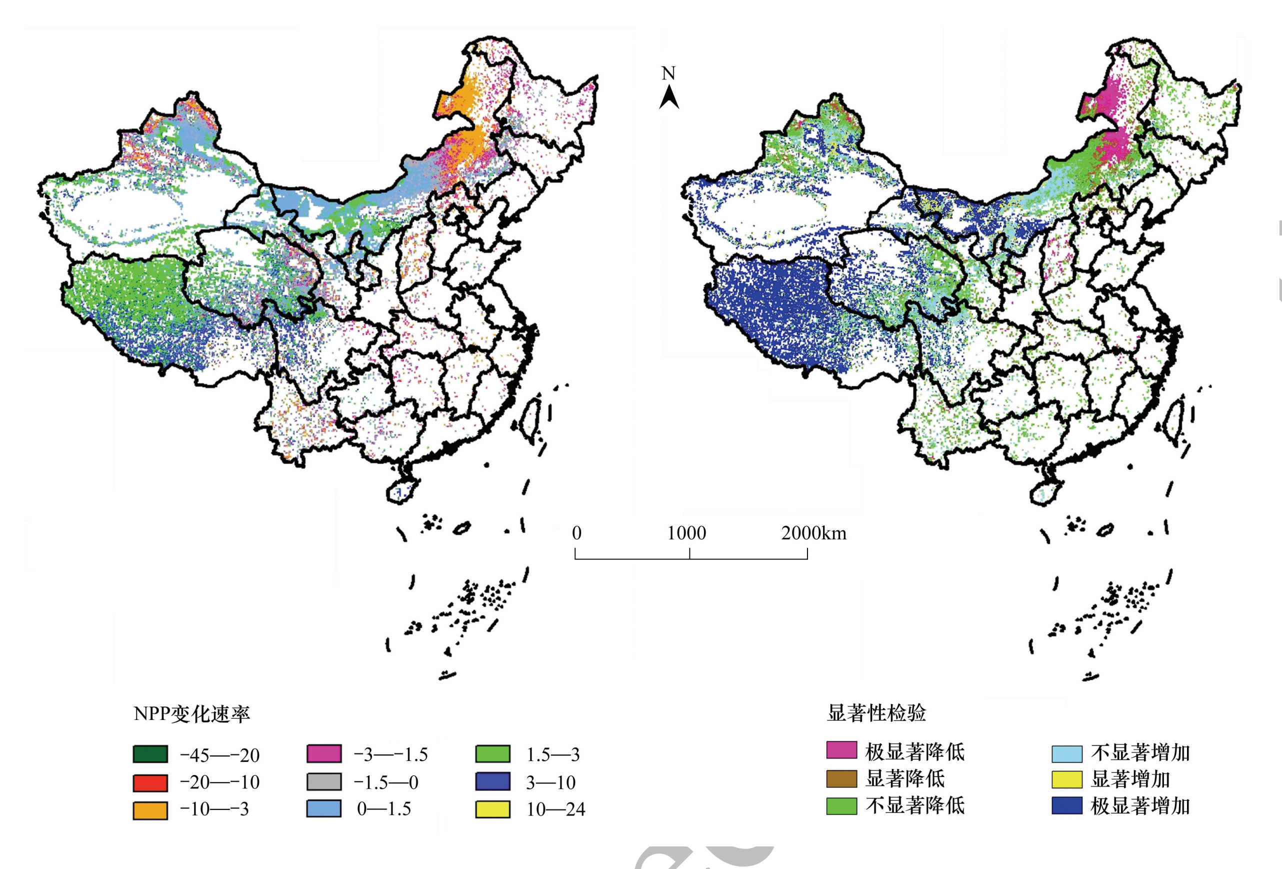


图 5 1982—2010 年草地 NPP 变化趋势和显著性检验

Fig.5 Grassland NPP changing trend and significance test from 1982 to 2010

表 2 不同草地类型 NPP 变化的显著性统计

Table 2 Statistical analysis of significance test of different grassland type′s NPP

草地类型 Grassland types	极显著减少 Extremely significant decrease/%	显著减少 Significant decrease/%	不显著减少 Insignificant decrease/%	不显著增加 Insignificant increase/%	显著增加 Significant increase/%	极显著增加 Extremely significant decrease/%
1	34.1	15	35.9	11.4	1.4	2.2
2	10.3	8.5	38.2	24.7	4.3	14
3	1.7	3.1	23.3	45.8	8.4	17.7
4	0	0.1	3.1	10.1	7.6	79.1
5	0.2	0.3	4.1	10.3	7.4	77.8
6	0	0	0.5	3.6	6	89.8
7	2.1	1.9	10.6	39.6	15.2	30.6
8	0.5	0.8	7.6	24.2	18	49
9	0.1	0.1	1.1	4	5.9	88.8
10	21.2	13	41.7	19.4	2.6	2
11	13.3	12.3	42.8	21.6	4	6
12	4.9	8.8	50.8	29.6	3.1	2.8
13	7.6	11.2	50.6	24.8	3	2.8
14	14.2	8.9	42	29.8	3.6	1.5
15	16.5	11.5	34	15.1	5.3	17.6
16	7.2	8	33.2	32.9	5.8	12.9
17	0.7	1.8	19.5	31.4	8.3	38.3
18	12.9	9.5	37.7	22.6	5.6	11.6

续表

草地类型 Grassland types	极显著减少 Extremely significant decrease/%	显著减少 Significant decrease/%	不显著减少 Insignificant decrease/%	不显著增加 Insignificant increase/%	显著增加 Significant increase/%	极显著增加 Extremely significant decrease/%
19	14.5	13.3	37.4	28.4	2.5	3.8
20	5.8	4.8	22.2	23.4	8	35.8

1:温性草甸草原 Temperate meadow steppe;2:温性草原 Temperate steppe;3:温性荒漠草原 Temperate desert steppe;4:高寒草甸草原 Alpine meadow steppe;5:高寒草原 Alpine steppe;6:高寒荒漠草原 Alpine desert steppe;7:温性草原化荒漠 Temperate steppification desert;8:温性荒漠 Temperate desert;9:高寒荒漠 Alpine desert;10:暖性草丛 Warm grass;11:暖性灌草丛 Warm shrub grass;12:热性草丛 Hot grass;13:热性灌草丛 Hot shrub grass;14:干热稀树灌草丛 Dry savanna shrub;15:低地草甸 Lowland meadow;16:山地草甸 Mountain meadow;17:高寒草甸 Alpine meadow;18:沼泽 Swamp;19:改良草地 Improved grassland;20:中国全部草地 Total grassland of China9.

图 7 是草地 NPP 与年均气温、降水量的相关系数分布图。总体上草地 NPP 与年均气温呈正相关(R=0.12),并且青藏高原西南部、阿拉善高原,相关系数达到显著正相关(P<0.05);然而蒙古高原的内蒙古部分、青藏高原西部、新疆北部、南方草山草坡分布区,其 NPP 与年均气温呈负相关。草地 NPP 与年降水量的相关系数为 0.22,空间分布上,大部分地区相关系数为正,尤其是蒙古高原的内蒙古部分、鄂尔多斯高原、青藏高原西部,相关系数达到显著正相关(P<0.05)。然而阿尔泰山以及青藏高原东南部等地区,其草地 NPP 与降水量呈负相关,与温度呈正相关;分析原因可能是该区域属于高海拔的冷湿环境,低温是植被生长的限制因子;并且近 30 年降水量增加明显(图 6),然而降水量的增加意味着气温的降低[25],从而抑制植被生长,因此草地 NPP 与降水量之间负相关关系的真正作用机制是受温度的影响。

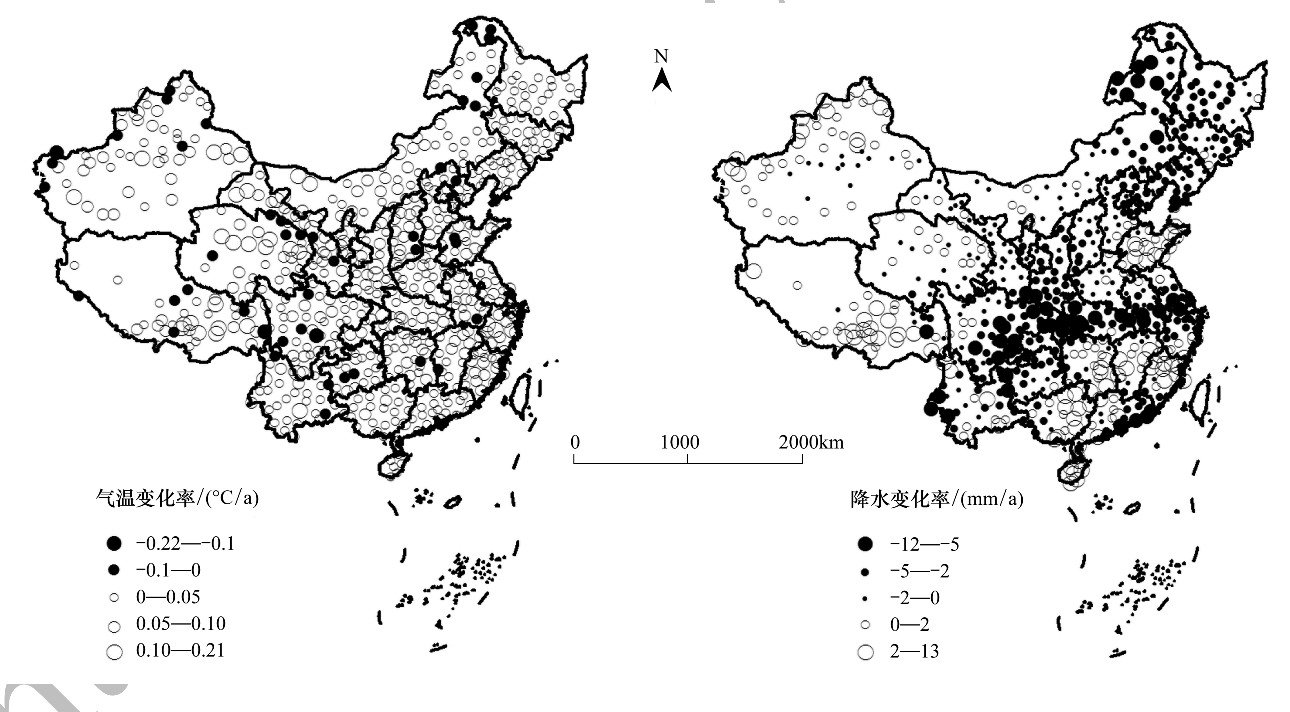


图 6 中国 1982—2010 年平均温度和降水量的变化趋势空间分布图

Fig.6 Change trend of annual mean temperature and precipitation during1982—2010 in China

3 讨论与结论

3.1 不同类型草地 NPP 的时间变化特征

1980s、1990s 中国草地 NPP 的增加趋势逐渐减少,2001—2010 年 NPP 呈减少趋势(图 8)。19 类草地 NPP 变化趋势的年代际间差异明显,总体上表现为 4 种特征:①高寒草甸草原、高寒荒漠草原、高寒荒漠、高

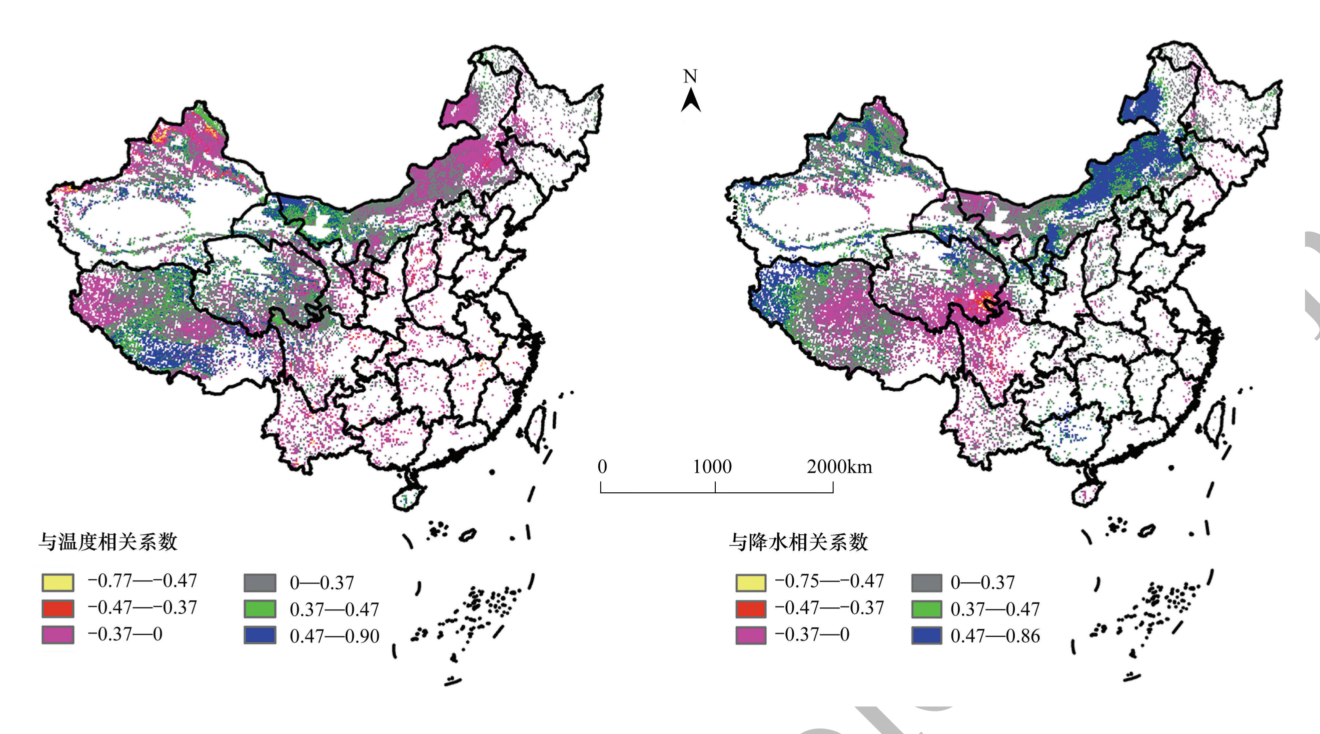


图 7　中国草地 NPP 与气温和降水量的相关系数空间分布图

Fig.7　Correlation coefficient between grassland NPP and temperature, precipitation in China

寒草原、温性荒漠、温性草原化荒漠、温性荒漠草原的 NPP 在 1982—2010 年均呈增加趋势,分析原因:一方面由于以上地区气候的暖湿化,有利于草地植被生长;另一方面国家退牧还草工程的实施,如人工种草、围栏封育和划区轮牧措施一定程度上促进草地植被生长,导致生产力提高。②山地草甸、高寒草甸、改良草地的 NPP 在 1982—2000 年呈增加趋势,在 2001—2010 年呈减少趋势。③温性草甸草原、温性草原、暖性草丛、暖性灌草丛、低地草甸、沼泽的 NPP 在 1980s 呈增加趋势,而在 1991—2010 年呈减少趋势。④热性草丛、热性灌草丛、干热稀树灌草丛的 NPP 在近 30 年均呈减少趋势,原因可能是近 30 年我国南方降水量减少,气温升高,暖干趋势明显(图 6),不利于草地生长和生产力提高。

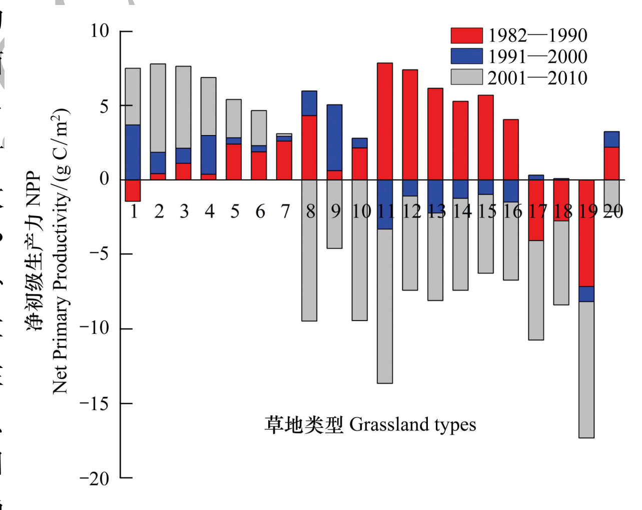


图 8　不同类型草地 NPP 的年代际变化趋势

Fig.8　The change trend of annual NPP of different grassland types from 1980s to 2010s

1: 高寒草甸草原;2: 高寒荒漠草原;3: 高寒荒漠;4: 高寒草原;5: 温性荒漠;6: 温性草原化荒漠;7: 温性荒漠草原;8: 山地草甸;9: 高寒草甸;10: 改良草地;11: 温性草甸草原;12: 沼泽;13: 暖性草丛;14: 暖性灌草丛;15: 温性草原;16: 低地草甸;17: 热性草丛;18: 热性灌草丛;19: 干热稀树灌草丛;20: 全部草地

3.2　气候水热因子变化对草地 NPP 的影响分析

气候变化是陆地植被活动年际变化的主要影响因素[26,27]。本研究发现:①1982—2010 年我国 84% 的草地分布区年均气温呈增加趋势(0.39℃/10a),稍低于全国 0.42℃/10a[28];②56% 的草地分布区年降水量呈减少趋势(-3.9mm/10a);③我国西北干旱区和青藏高原地区气温升高,降水量也增加,这与前人关于中国西北地区气候变化的研究结论一致,即我国西北地区气候自 1980s 以来暖湿趋势明显[8]。因为降水量的增加使得水分对草地生长的胁迫作用降低,进而促进干旱地区草地生长;④我国 67.2% 的草地分布区的 NPP 呈增加趋势,增加速率达到 0.6 gC $m^{-2}a^{-1}$。

水热因子对草地 NPP 的影响方面:NPP 与降水量的相关系数大于与温度的相关系数(R=0.22,0.12),表

明草地植被的生长受降水量的影响更大,因为水分是草地生命活动和草地 NPP 变化最主要的限制性因子,尤其在干旱地区[29]。由于温度的增加则意味着蒸散量的加强和可利用水分的减少,使环境更加干旱[30]。但不同类型草地 NPP 对温度、降水量的依赖程度存在差异(表 3),研究发现,温性荒漠草原 NPP 与降水量的相关系数最大(R=0.44),达到极显著正相关;温性草原(R=0.4)和温性草甸草原(R=0.4)次之,达到显著正相关;这是由于以上 3 种草地主要分布在西部干旱半干旱地区,对于干旱地区降水的增加有利于草地植被的生长[31]。殷贺等在对内蒙古荒漠化研究中也发现,降水因子和荒漠区植被恢复有着密切的联系,降水量较高的丰水年份,荒漠边缘的稀疏草地和灌丛生长状况较好,植被恢复较好[32]。暖性草丛、暖性灌草丛、热性草丛、热性灌草丛、干热稀树灌草丛的 NPP 与温度呈负相关,由于南方草山草坡分布区气候炎热,温度升高将进一步导致蒸散发量增加,不利于草地植被生长。

表 3 不同类型草地 NPP 与年均气温和年总降水量的相关系数

Table 3 Coefficient between grassland NPP and annual mean temperature and precipitation

草地类型 Grassland types	与气温相关系数 Coefficient correlation with temperature	与降水量相关系数 Coefficient correlation with precipitation	草地类型 Grassland types	与气温相关系数 Coefficient correlation with temperature	与降水量相关系数 Coefficient correlation with precipitation
1	0.03	0.40*	2	0.03	0.40*
3	0.06	0.44**	4	0.25	0.05
5	0.19	0.19	6	0.17	0.36
7	0.12	0.34	8	0.23	0.23
9	0.24	0.37	10	−0.11	0.17
11	−0.06	0.12	12	−0.06	0.15
13	−0.1	0.16	14	−0.13	0.11
15	0.13	0.23	16	0.06	0.03
17	0.2	0.01	18	0.12	0.18
19	0.06	0.27	20	0.12	0.22

1—20 意义同表 2; * 显著相关(P<0.05), ** 极显著相关(P<0.01)

3.3 结论

(1)中国草地年平均 NPP 为 282.0 gC $m^{-2}a^{-1}$,年总 NPP 为 988.3 TgC。在 1982—2010 年间,草地 NPP 呈增加趋势(0.6 gC $m^{-2}a^{-1}$),呈增加趋势的草地面积占中国草地总面积的 67.2%。

(2)空间分布上,中国草地 NPP 呈现东南部高西北部低的特征。NPP 显著增加的区域位于青藏高原西部、阿拉善高原、新疆西部,显著降低的区域位于内蒙古地区。

(3)中国草地 NPP 在不同年代际和不同草地类型的变化趋势不同。1980—2000 年草地 NPP 呈增加趋势,2010 年以来呈减少趋势;其中高寒地区草原和荒漠地区草原其 NPP 在近 30 年均呈增加趋势,而热带地区灌草丛其 NPP 在近 30 年均呈减少趋势。

(4)降水量对中国草地 NPP 的影响比气温的影响更明显。不同草地类型 NPP 对年均气温、年总降水量的依赖程度不同,其中温性荒漠草原 、温性草原、温性草甸草原其 NPP 与降水量间达到显著正相关(P<0.05),而暖性草丛、暖性灌草丛、热性草丛、热性灌草丛、干热稀树灌草丛的 NPP 与温度呈负相关。

参考文献(References):

[1] Walker B, Steffen W. IGBP Science No. 1: a synthesis of GCTE and related research. Stockholm: IGBP, 1997: 1-24.

[2] 张新时. 研究全球变化的植被——气候分类系统. 第四纪研究, 1993, (2): 157-169.

[3] Fifth Assessment Report-Climate change 2013. http://www. ipcc. ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5 _ SummaryVolume _ FINAL _ CHINESE.pdf

[4] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 58-66.

[5] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.

[6] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, Peng C H, Ji W, Knapp A K, Smith M D. Interannual variability in net primary production and precipitation. Science, 2001, 293(5536): 1723-1723.

[7] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. BioScience, 2004, 54(6): 547-560.

[8] Shi Y F, Shen Y P, Kang E S, Li D L, Ding Y J, Zhang G W, Hu R J. Recent and future climate change in northwest China. Climatic Change, 2007, 80(3/4): 379-393.

[9] 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 陈振华. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率. 地理学报, 2000, 55(3): 281-293.

[10] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 朱锦红, 姚檀栋. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报, 1998, 9(4): 392-401.

[11] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, Pan X H. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.

[12] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(4): 563-569.

[13] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 宋国宝. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. 科学通报, 2007, 52(21): 2535-2541.

[14] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. Global Change Biology, 1998, 4(2): 229-233.

[15] Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. Climatic Change, 2004, 67(2/3): 237-246.

[16] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 盛文萍, 江村旺扎, 王宝山, 李文福. 藏北高寒草地 NPP 变化趋势及其对人类活动的响应. 生态学报, 2007, 27(11): 4612-4619.

[17] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Tan K, Tao S. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(2): GB2002.

[18] 王玉辉, 周广胜. 内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应. 生态学报, 2004, 24(6): 1140-1145.

[19] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786-797.

[20] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 魏丹丹, 张程. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系. 生态学报, 2010, 30(5): 1367-1378.

[21] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.

[22] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.

[23] Zhu W Q, Pan Y Z, He H, Yu D Y, Hu H B. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(4): 457-463.

[24] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.

[25] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.

[26] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO_2 measurements. Nature, 1996, 382(6587): 146-149.

[27] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw R M, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. BioScience, 2003, 53(10): 941-952.

[28] Piao S L, Fang J Y, Ji W, Guo Q H, Ke J H, Tao S. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China. Journal of Vegetation Science, 2004, 15(2): 219-226.

[29] Guo R, Wang X K, Ouyang Z Y, Li Y N. Spatial and temporal relationships between precipitation and ANPP of four types of grasslands in northern China. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1024-1030.

[30] Shen W S, Li H D, Sun M, Jiang J. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008. Global and Planetary Change, 2012, 86-87: 37-44.

[31] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Wang W. Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands. Geophysical Research Letters, 2008, 35(23): L23710.

[32] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 蔡福. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价. 地理学报, 2011, 66(5): 653-661.